



## 폭발 손상을 입은 강섬유 및 FRP 시트 보강 철근콘크리트 보의 국부손상 및 잔류성능 평가

이진영<sup>1)</sup> · 장대성<sup>1)</sup> · 권기연<sup>1)</sup> · 윤영수<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>고려대학교 건축사회환경공학부

### Evaluation of Local Damages and Residual Performance of Blast Damaged RC Beams Strengthened with Steel Fiber and FRP Sheet

Jin-Young Lee,<sup>1)</sup> Dae-Sung Jang,<sup>1)</sup> Ki-Yeon Kwon,<sup>1)</sup> and Young-Soo Yoon<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>School of Civil, Environmental & Architectural Engineering, Korea University, Seoul, Korea

**ABSTRACT** In this study, standoff detonation tests and static beam tests on 160×290×2200mm RC beams were conducted to investigate the effect of local damage on the flexural strength and ductility index. And also, blast resistance of RC beams strengthened with steel fiber and FRP sheet were evaluated by these tests. The standoff detonation tests were performed with charge weight of 1kg and standoff distance of 0.1m. After the tests, crater diameters and loss weights of specimens were measured to evaluate the local damage of specimens. Flexural strength and ductility index were measured by conducting the static beam tests on the damaged and undamaged specimens. As a test results, normal concrete specimen(NC) showed relatively large crater and spall diameters that caused weight loss of 23.5kg as a local damage. Whereas, steel fiber reinforced concrete specimen(SFRC) and FRP sheet retrofitted specimens(NC-F, NC-FS) showed higher blast resistance than NC by reducing crater size and weight loss. Flexural strength and ductility index were decreased in case of local damaged specimens by detonation. Especially, large decrease of flexural strength was shown in NC as compared with intact specimen and brittle failure was occurred due to buckling of compressive reinforcement. In case of specimens strengthened with steel fiber and FRP sheet, residual flexural strength and ductility index were increased as compared with NC. In these results, it is concluded that critical local damage can be occurred unless enough standoff distance can be assured even if the charge weight is small. and it is verified that strengthening method using steel fiber and FRP sheet can increase blast resistance.

**Keywords** : blast test, steel fiber reinforced concrete (SFRC), FRP sheet, local damage, residual flexural strength

### 1. 서 론

폭압으로부터 구조물을 가장 효과적으로 방호하는 방법은 이격거리를 확보하는 것이다. 달리 말해 구조부재는 근접 폭발에 매우 취약하며, 이러한 근접 폭발로 인해 구조부재에 국부 손상이 발생할 경우 이는 구조물의 연쇄붕괴(progressive collapse)로 이어질 수 있다. 이러한 이유에서 미국의 주요 건물들은 차량 폭탄으로 인한 근접 폭발의 위협을 줄이기 위해 차량의 근접 진입을 통제하고 있다. 하지만 이러한 이격거리 확보가 어려울 경우 구조부재에 대한 방호 설계가 반드시 수행되어야 한다.<sup>1-8)</sup>

하지만 방폭 설계의 경우 사안의 심각성에 비해 그 중요성에 대한 인식이 부족하다. 특히 Fig. 1에서와 같이 민간 상업 시설에 대한 테러 빈도가 다른 시설물에 비해 월등히 높음에도 불구하고 방폭에 대한 연구는 군사 시설에 한정되어 이루어지고 있다.<sup>1,9)</sup> 군사 시설의 경우 민간 구조물과 달리 구조부재의 두께 및 크기를 증가시키고 많은 강재를 사용하여 방폭성능을 확보한다는 점에서 민간 구조물에 대한 별도의 방폭 연구가 필요하다.

그러므로 본 연구에서는 기본 구조부재인 철근콘크리트 보에 대하여 근접 폭발 시험을 수행하였으며 국부 손상이 발생한 시험체의 잔류 휨강도와 연성지수를 측정함으로써 시험체의 폭발저항성능을 평가하였다. 또한 철근콘크리트보의 폭발저항성능을 향상시키기 위하여 강섬유와 FRP 시트에 의한 보강 방안을 고려하였다.<sup>10-14)</sup>

\*Corresponding author E-mail : ysyoon@korea.ac.kr

Received April 24, 2014, Revised June 17, 2014,

Accepted July 23, 2014

©2014 by Korea Concrete Institute

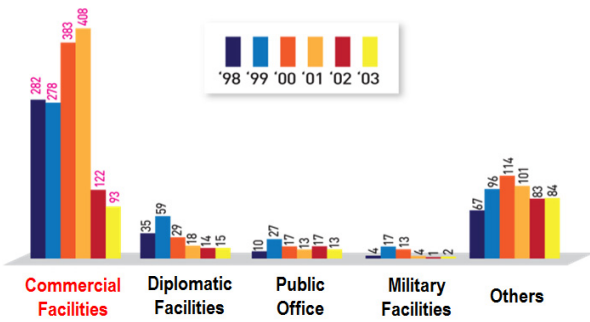


Fig. 1 Total facilities struck by international attacks<sup>9)</sup>

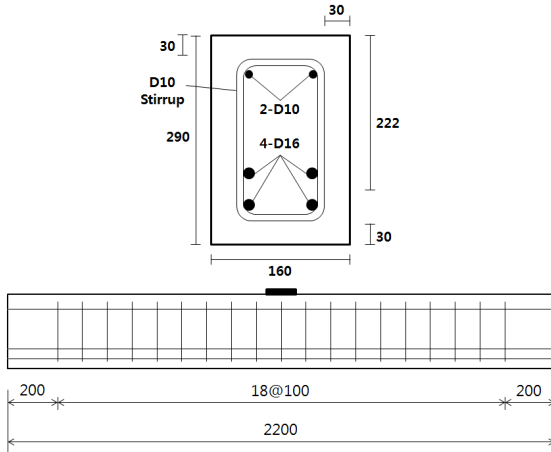


Fig. 2 Test specimen

## 2. 폭발저항성능 평가 시험 개요

### 2.1 시험 개요

일반적으로 구조 부재의 폭발저항성능을 평가하기 위해서는 처짐, 지점의 회전각 등을 측정한다. 특히 미공병단 방폭관련 규정인 TM 5-1300에서는 구조부재의 지점 회전각을 이용해 폭발에 의한 피해 정도를 평가하고 있다.<sup>15,16)</sup> 하지만 이러한 방법은 재료에 따른 특성을 반영하지 못한다는 점에서 재료변수를 가진 폭발 시험에는 적합하지 않다. 따라서 본 연구에서는 시험체의 국부손상 정도를 측정하고, 폭발하중을 받지 않은 시험체와 폭발하중을 받아 국부손상이 발생한 시험체의 정하중 휨시험을 수행함으로써 폭발저항성능을 평가하고자 하였다.

### 2.2 시험 변수 및 재료 특성

본 시험에 사용된 시험체는 Fig. 2에 나타난 160×290×2200 mm의 철근콘크리트 보이며, Table 1에 나타난 변수에 따라 총 9본을 제작하였다.

2본의 NC 부재는 폭발 하중 결정을 위한 예비 시험에 사용되었으며, NC-FS를 제외한 모든 부재는 동일한 변수에 대하여 정하중 휨시험을 수행하였다.

본 연구에 사용된 재료 물성과 콘크리트 배합표는 Table

Table 1 Test Variables

Notation	Concrete	FRP	No. of Specimens
NC	Normal Concrete	Not retrofitted	4
NC-F		Flexural reinforcement with CFRP sheet	2
NC-FS		Flexural and shear reinforcement with CFRP sheet	1
SFRC	SFRC with 60mm Steel fiber	Not retrofitted	2

Table 2 Mix proportions of NC and SFRC

Type of concrete	Max. size of aggregate	Slump (cm)	Air content	W/C (%)	s/a (%)
NC	25	150	3.0	40	44
SFRC	25	150	3.0	40	44

Type of concrete	Unit Weighty (kg/m <sup>3</sup> )				
	Water (kg/m <sup>3</sup> )	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	Fine aggregate (kg/m <sup>3</sup> )	Coarse aggregate (kg/m <sup>3</sup> )	Steel fiber (%) <sup>*</sup>
NC	140	350	792	1015	0.0
SFRC	140	350	792	1015	1.0

\*Volume fraction of fibers

Table 3 Mechanical properties of concrete

Type of concrete	Compressive strength (MPa)	Flexural strength (MPa)
NC	38.7	4.7
SFRC	31.0	6.4

Table 4 Mechanical properties of FRP materials

	Fiber	Resin
	High strength carbon	Epoxy
Tensile strength (MPa)	4,900	90
Elastic modulus (GPa)	230	3.0
Ultimate strain (%)	2.1	8.0
Thickness (mm)	0.111	-

2~6에 나타나 있다. 보통콘크리트와 강섬유보강콘크리트(steel fiber reinforced concrete, SFRC)는 설계기준강도가 35 MPa인 동일한 콘크리트 배합이며, 섬유 혼입율에만 차이가 있다. 또한 압축강도는 각각 38.7 MPa, 31.0 MPa이며 휨강도는 4.7 Mpa, 6.4 MPa이다. FRP 시트는 CFRP 시

**Table 5** Properties of steel fibers

Type of fiber	Length (mm)	Diameter (mm)	Aspect ratio	Tensile strength (MPa)	Type
Long fiber	60	0.75	80	1,196	End-hooked

**Table 6** Properties of reinforcement

Reinforcement	Diameter (mm)	Tensile strength (MPa)	Ultimate elongation (%)	Total elongation under max. load (%)
Deformed bar	10 / 16	605.3	18.67	11.4

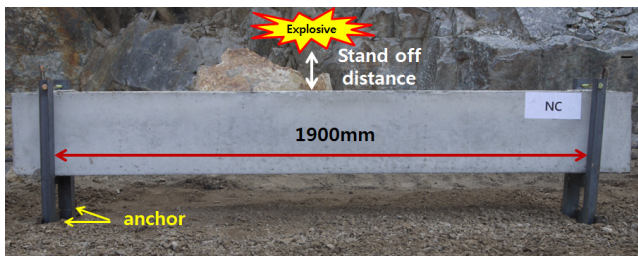
트 2장을 에폭시 레진을 사용하여 현장 시공하였다. 강섬유보강콘크리트는 보통콘크리트와 동일한 배합에 60 mm 강섬유를 1%(체적비) 혼입하여 제작하였다. NC-F는 CFRP 시트 2장을 부재 하부에 부착하여 휨보강 하였으며, NC-FS는 NC-F와 동일하게 휨 보강을 한 부재에 1 m의 CFRP 시트 2장으로 전단 보강하였다.

**2.3 폭발 시험 장치 및 방법**

**2.3.1 폭발 시험 장치**

모든 시험체는 폭발 하중을 받은 후 리바운드를 막기 위하여 Fig. 3에서와 같이 지점을 말뚝으로 고정하였다. 시간 거리는 1.9 m이며, 폭약의 이격거리 및 장약량은 예비시험을 통해 결정하였다. 본 시험에 사용된 폭약은 TNT 등가 계수가 1.01이며 유중수적형(water in oil)의 에멀전상인 New-emulite150을 사용하였다. 폭약의 재료 특성은 Table 7에 나타나있다.

폭발시험 후 시험체에 발생한 국부손상 크기를 측정하였으며 시험 전후의 시험체 무게를 측정하여 폭발에 의한 무게 손실을 알아보았다.



**Fig. 3** Blast test setup

**Table 7** Properties of explosive

Detonation velocity (m/s)	Volume density (g/cc)	Energy of explosion (kcal/kg)	Drop sensitivity (cm)	Amount of gas (l/kg)
5,900	1.18 ~ 1.50	1140	100	820

**Table 8** Level of protection for high capacity wall catcher system

TNT Equivalent (kg)	Standoff distance for Medium Level of Protection (m)
25 (55lb)	1 (3ft)

**Table 9** Variables of preliminary test

Test No.	Weight of charge (kg)	Standoff distance (m)
NC-SD34	1	0.34
NC-SD10	1	0.1

**2.3.2 이격거리 및 장약량 결정**

폭약의 이격거리 및 장약량을 결정하기 위하여 Table 8에 나타난 UFC 4-023-02 (Unified Facilities Criteria)의 자료를 참고하고 Conweb을 사용하여 예비 시험의 변수를 결정하였다. 단 모든 폭발 시험은 소음과 진동의 제약 조건으로 인해 장약량을 1 kg으로 고정하고 식 (1)을 이용하여 이격거리를 환산하였다.<sup>1)</sup>

$$\lambda = \frac{R}{W^{1/3}} = \frac{R_1}{W_1^{1/3}} \tag{1}$$

- $\lambda$  = scaled distance
- R = standoff distance
- W = weight of charge

따라서 예비 시험에서는 Table 9의 변수를 사용하여 NC 시험체 2본에 대하여 예비 폭발시험을 수행하였다. NC-SD34는 앞서 나타난 Table 8과 동일한 환산거리를 갖는 값이며, NC-SD10은 시험체에 0.25 m 지름의 crater를 일으킬 때의 값으로서 Conweb을 사용해 도출하였다.<sup>17)</sup>

예비 시험결과 NC-SD34의 경우, shear plug 형태의 미세한 균열이 발생할 뿐 국부손상이 발생하지 않았으며 NC-SD10의 경우 Conweb의 결과 값보다 큰 0.67 m 지름의 crater가 발생하였다.

이러한 예비시험결과를 바탕으로 본 시험에서는 시험 목적에 적합한 국부손상을 발생시키는 NC-SD10과 동일한 조건으로 폭발시험을 수행하기로 계획하였다.

**2.4 정하중 휨시험 장치 및 방법**

본 시험에서는 Fig. 4에 나타난 정하중 휨시험 장치를 사용하여 정하중 휨시험을 수행하였다. 시간 거리는 폭발시험과 동일한 1.9 m이며, 하중의 재하는 액추에이터를 이용하여 0.02 mm/s의 속도로 하중을 재하하였다. 또한 부재의 중앙과 지점 위치에 LVDT (linear variable differential transducer)를 설치하여 변위를 측정하였다. 잔류 휨강도 측정을 위한 시험에서는 국부손상을 입은 시험체의 중앙

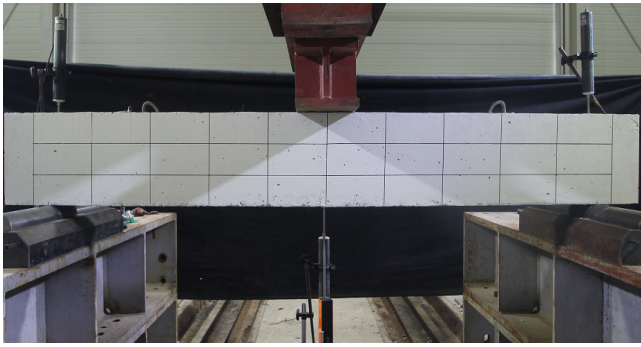


Fig. 4 Static flexural test setup

Table 10 Local damage of specimens

Variables	Local damage		Shear-Plug	
	C (cm)	Cd (cm)	S (cm)	Degree (°)
NC	77	14	89	26   29
SFRC	48	12	105	34   25
NC-F	79	15	103	30   25
NC-FS	59	13	61	34   44

부에 초고강도 석고를 이용해 캡핑하여 가력 시 편심하중이 발생하지 않도록 하였다.

### 3. 해석 결과 및 분석

#### 3.1 폭발에 의한 국부손상 평가

폭발에 의한 콘크리트의 국부손상은 crater, spall, 그리고 breach 이렇게 세 가지로 구분할 수 있다. crater는 폭발하중을 받는 면의 콘크리트가 국부적으로 파쇄되어 움푹 파이는 현상이며, spall은 폭발하중을 받은 시험체의 배면이 인장응력에 의해 파괴되는 현상이다. 또한 breach는 crater와 spall의 깊이가 깊어 콘크리트 시험체를 관통하는 현상을 의미한다.<sup>18-21)</sup> 그리고 콘크리트 부재가 폭발하중과 같은 집중된 충격하중을 받게 되면 하중 재하 지점을 중심으로 전단균열이 발생하게 되는데 이를 shear plug라고 한다. shear plug는 부재의 전단강도와 관계없이 발생하며 정하중 재하 시와 다른 파괴 양상을 보인다는 점에서 국부손상에 대한 평가 시 검토할 필요가 있다.<sup>22,23)</sup> 따라서 본 연구에서는 폭발 시험 후 시험체에 발생한 국부손상의 크기를 측정하여 손상정도를 평가하였으며 Table 10에 그 결과를 나타내었다.

모든 시험체는 Fig. 5에 나타난 바와 같이 crater와 spall이 발생하였으며 breach는 발생하지 않았다. NC와 NC-F는 crater 지름이 각각 77 cm, 79 cm로 유사하게 나타났으며 NC-F는 인장보강한 FRP 시트가 박리되었다. SFRC와

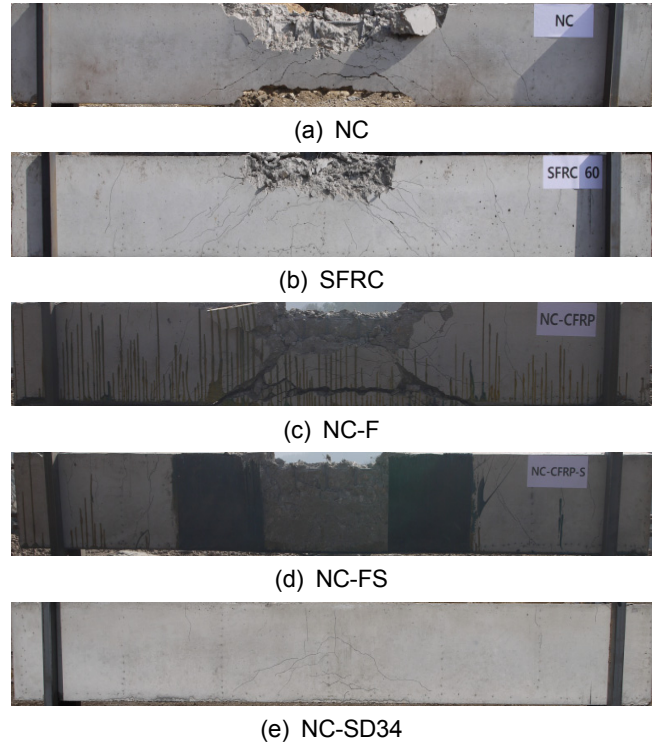


Fig. 5 Local damage of specimens

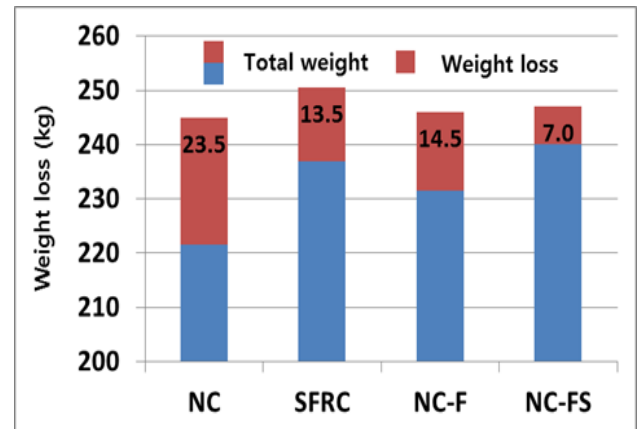


Fig. 6 Weight loss of specimens

NC-FS는 crater 지름이 각각 48 cm, 59 cm로 NC시험체에 비해 약 38%, 23% 크기가 감소하였다.

SFRC와 NC-FS에서 작은 국부 손상이 발생한 이유는 SFRC의 경우 강섬유가 균열 사이에서 가교역할(bridge effect)을 하며 균열 저항성능을 증가시켰기 때문이며, NC-FS의 경우 FRP 시트가 외피 보강재 역할을 하여 국부손상이 감소한 것으로 판단된다.<sup>24,25)</sup>

또한 모든 부재에서는 shear plug가 발생하였으며 그 크기는 시험체에 따라 다르게 측정되었다. 일반적으로 shear plug는 균열진전 속도보다 충격파의 속도가 더 빠르기 때문에 발생하게 되는데 SFRC의 경우 섬유를 따라 균열이 빠르게 전달되었기 때문에 더 큰 S 값을 갖는 shear plug가 발생하였다. NC-FS의 경우 큰 전단응력을 발생시키는 큰 각도의 shear plug가 발생하였지만 부착된 FRP 시트가

박리되었을 뿐 가장 작은 국부손상 정도를 나타내었다. 이러한 점에서 폭발하중을 받는 부재의 경우, 보와 같은 휨 부재에서도 추가적인 전단 보강이 필요함을 알 수 있었다.

Fig. 6에서는 폭발 손상에 의한 시험체의 무게 손실(weight loss)을 나타내었다. 폭발하중을 받은 시험체는 crater 및 spall의 발생으로 인해 무게가 감소하였으며 Table 10에 나타난 국부손상 측정결과와 유사한 경향의 결과가 나타났다.

NC는 가장 많은 23.5 kg의 무게 손실이 발생하였으며 NC-FS, SFRC, NC-F의 순으로 적은 무게 손실을 나타내었다. 이는 NC에 비해 70%, 38%, 43% 무게 손실이 감소한 결과이다. 이러한 결과를 종합하여 볼 때 강섬유를 혼입하여 보강할 경우 국부손상에 대한 폭발 저항성능이 증가하였으며, 또한 FRP 시트로 전단보강을 할 경우에는 전단강도의 증가뿐만 아니라 FRP 시트가 시험체의 외피 보강재 역할을 함으로써 국부손상에 대한 폭발저항성능이 증가하는 것을 확인 할 수 있었다.

### 3.2 정하중 휨시험 결과 및 연성지수

Table 11, 12 및 Fig. 7에는 폭발하중을 받지 않은 시험체와 폭발하중을 받아 국부손상이 발생한 시험체의 정하중 휨시험 결과가 나타나있다. 이 시험 결과에서 주목할

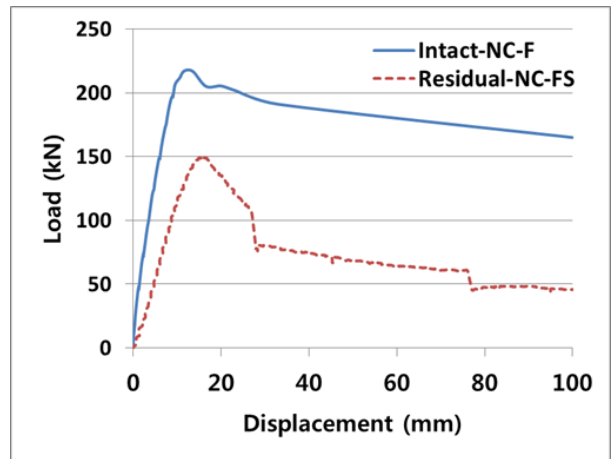
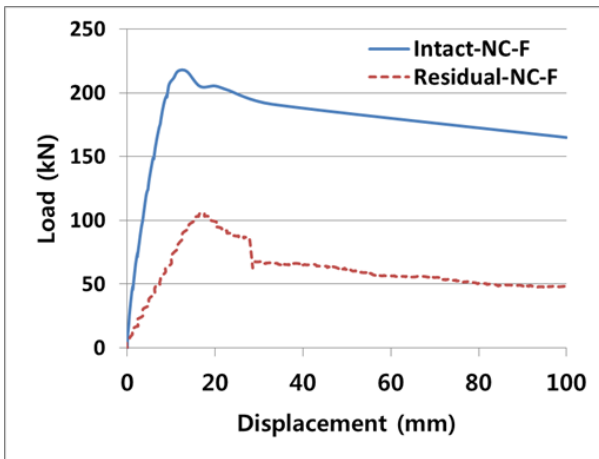
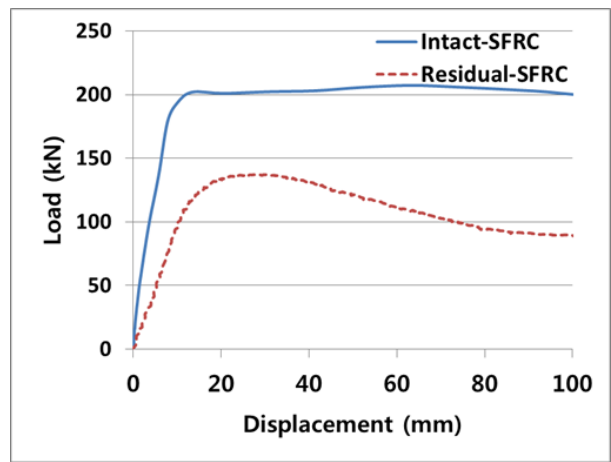
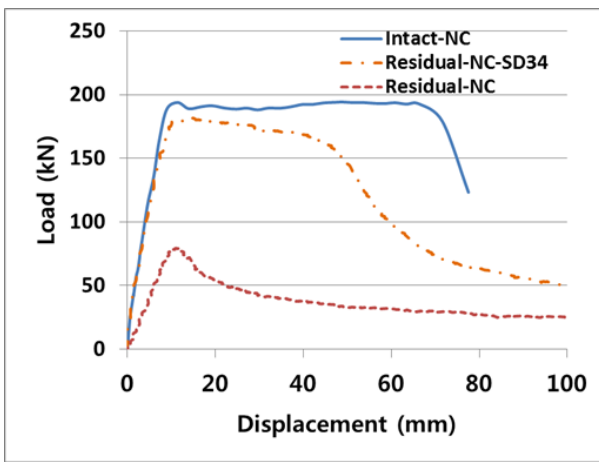
점은 폭발하중에 의한 국부손상이 휨강도 저하에 미치는 영향과 각 재료 변수에 따른 폭발저항성능이다. 또한 식 (2)에 나타난 연성지수(ductility index)를 비교함으로써 국부손상이 부재의 연성 감소에 미치는 영향을 알아보았다.

**Table 11** Test results of undamaged specimens

Variables	Max. load of test (kN)	Flexural strength (kN·m)	Ductility Index ( $\phi_u/\phi_y$ )
NC	196.5	186.7	7.9
SFRC	207.5	197.1	11.5
NC-F	217.5	206.6	3.3

**Table 12** Test results of damaged specimens

Variables	Max. load of test (kN)	Residual strength (kN·m)	Ductility Index ( $\phi_u/\phi_y$ )
NC	79.3	75.3	1.3
NC-SD34	181.6	172.5	4.4
SFRC	137.2	130.3	2.7
NC-F	105.9	100.6	1.9
NC-FS	149.5	142.0	1.9



**Fig. 7** Load-deflection curves of specimens

$$Ductility\ Index = \frac{\phi_y}{\phi_u} \quad (2)$$

$\phi_y$  = yield curvature

$\phi_u$  = ultimate curvature

폭발하중을 받지 않은 시험체들은 휨강도가 186.7~206.6 kN·m로서 재료 변수에 따른 차이가 크지 않지만 연성지수에서는 차이를 나타냈다. Fig. 7의 그래프에서 확인할 수 있듯이 강섬유로 보강된 SFRC는 연성지수가 11.5로 가장 크게 나타났으며 NC는 7.9를 나타냈다. FRP 시트로 휨 보강한 NC-F는 206.6 kN·m로 가장 큰 휨강도를 나타내었지만 FRP 시트의 취성적인 부착파괴가 발생하며 3.3의 연성지수를 나타냈다.

폭발하중에 의해 국부손상이 발생한 시험체들은 휨강도와 연성지수에서 큰 감소가 나타났다. 특히 NC는 잔류강도가 75.3 kN·m으로 손상 전 휨강도의 40.3%밖에 발휘하지 못하였고 연성지수는 1.3으로 Fig. 8(a)에서와 같이 압축철근의 좌굴 현상이 발생하며 취성적 파괴가 나타났다. 강섬유로 보강한 SFRC는 잔류강도가 130.3 kN·m으로 손상 전 휨강도의 66.1%를 발휘하였으며 Fig. 8(b)와 같이 압축철근의 좌굴현상이 나타났지만 연성지수가 2.7로 시험체 중에서 가장 큰 값을 나타내었다. FRP 시트로 보강한 부재들의 잔류강도는 NC-F는 100.6 kN·m, NC-FS는 142.0 kN·m이었으며 손상 전 NC-F의 휨강도와 비교해 보았을 때 각각 48.7%, 68.7%의 휨강도를 발휘하였다. NC-F와 NC-FS의 연성지수는 1.9로 동일하였으며 Fig. 8(c), (d)와 같이 두 시험체 모두 압축철근의 좌굴현상이 발생하였다.

상기 시험결과를 통해, 폭발에 의한 부재의 국부손상은 부재의 휨강도와 연성을 감소시켜 갑작스러운 취성파

괴를 유발할 수 있다는 것을 시험적으로 확인하였다. 또한 강섬유 및 FRP 시트를 사용한 보강 방법이 폭발하중에 의한 국부손상을 저감시키는데 효과가 있음을 알 수 있었다. 하지만 FRP 시트로 보강한 경우 재료의 취성적 특성으로 인해 적용 시 주의가 필요할 것으로 판단된다.

예비 시험을 위해 이격거리를 달리하여 시험한 NC-SD34는 휨강도와 연성지수가 상대적으로 크게 감소하지 않았다. 잔류강도는 172.5 kN·m으로 손상 전 휨강도의 92.4%를 발휘하였으며 연성지수는 4.4이었다. 이러한 결과를 통해서 이격 거리를 확보하는 것이 구조물의 가장 효과적인 방호 방법임을 시험을 통해 확인할 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 철근콘크리트 보에 대하여 근접 폭발 시험을 수행하였으며 폭발하중에 의한 국부손상이 철근콘크리트 보의 잔류 휨강도 및 연성지수에 미치는 영향을 알아보기 위하여 국부손상 크기를 측정하고 정하중 휨시험을 수행하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

- 1) 근접 폭발이 발생할 경우, 충분한 이격거리를 확보하지 못하면 장약량이 적더라도 구조부재에 심각한 국부손상을 발생 시킬 수 있다. 시험 결과, 이격거리가 0.34 m인 NC-SD34는 국부손상에 의한 무게 손실이 없었던 반면, 이격거리가 0.1 m인 NC는 지름 77 cm, 89 cm의 crater와 spall이 발생하였으며 국부손상에 의한 무게 손실이 23.5 kg 발생하였다.
- 2) 강섬유 및 FRP 시트로 보강할 경우 폭발에 의한 국부손상이 감소하였다. SFRC와 NC-FS는 NC에 비해 crater 지름이 약 38%, 23% 크기가 감소하였다. 특히 SFRC는 국부 손상에 의한 무게 손실이 NC에 비해 38%감소하며 향상된 폭발저항성을 나타내었다. FRP 시트로 보강한 NC-F와 NC-FS는 무게손실이 NC에 비해 43%, 70% 감소하였다.
- 3) 폭발 하중을 받은 모든 부재에서 shear plug가 나타났다. 이러한 전단균열은 하중 재하 속도가 빠른 충격 및 폭발 하중 재하 시에 주로 나타나며 취성적인 전단파괴로 이어질 수 있다. 바로 이러한 점에서 폭발하중을 받는 부재의 경우, 보와 같이 휨하중을 받는 부재에서도 전단 보강에 대한 검토가 필요함을 시험을 통해 확인할 수 있었다.
- 4) 폭발하중에 의해 국부손상이 발생한 시험체들은 휨강도와 연성지수에서 큰 감소가 나타났다. 아무런 보강을 하지 않은 NC는 잔류 휨강도가 기존 강도의 40.3%밖에 발휘되지 못하였고 압축철근의 좌굴현상이 나타나며 취성적으로 파괴되었다. 강섬유와 FRP 시트로 보강한 시험체의 경우 잔류 휨강도가 NC에 비해 20% 이상 증가하였고 연성지수는 107%, 46% 증가하였다. 그러므로 폭발에 의한 위험성이 높은 구조부재의 경우 강섬유 및 FRP 시트에 의한 보강이 폭발저항성 향상에 효과가 있다고 판단된다.

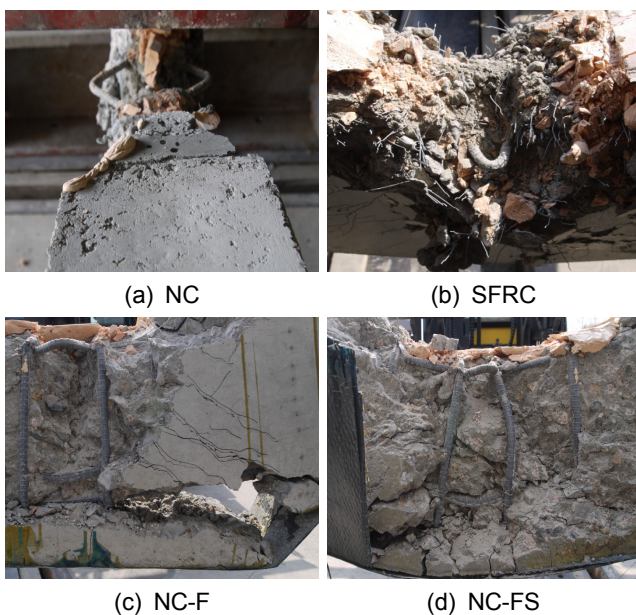


Fig. 8 Buckling of compressive reinforcement

## 감사의 글

이 연구는 국토교통부 건설기술연구사업 방호·방폭 연구단(과제번호 : 13건설연구S02)의 연구지원에 의해 수행되었습니다.

## References

1. Krauthammer, T., *Modern Protective Structures*, CRC Press, 2008.
2. Biggs, J. M., *Introduction to Structural Dynamics*, McGraw-Hill, New York, 1964, pp. 3-26.
3. Dusenberry, D. O., *Handbook for Blast-Resistant Design of Buildings*, John Wiley & Sons, 2010.
4. Schenker, A., Anteby, I., Gal, E., Kivity, Y., Nizri, E., Sadot, O., Michaelis, R., Levintant, O., and Ben-Dor, G., "Full-scale Field Tests of Concrete Slabs subjected to Blast Loads," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 35, No. 3, 2008, pp. 184-198.
5. Silva, P. F. and Lu, B., "Improving the Blast Resistance Capacity of RC Slabs with Innovative Composite Materials," *Composite Part B: Engineering*, Vol. 38, No. 5-6, 2007, pp. 523-534.
6. Quintero R., Wei J., Galati N., and Nanni, A., "Failure Modeling of Bridge Components Subjected to Blast Loading Part II: Estimation of the Capacity and Critical Charge," *International Journal of Concrete Structures and Materials*, Vol. 1, No. 1, 2007, pp. 29-36.
7. Kim, H. J., Nam, J. W., Kim, S. B., Kim, J. H., and Byun, K. J., "Analytical Evaluations of the Retrofit Performances of Concrete Wall Structures Subjected to Blast Load", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 19, No. 2, 2007, pp. 241-250.
8. Ha, J. H., Yi, N. H., Kim, S. B., Choi, J. K., and Kim, J. H., "Experimental Study on Blast Resistance Improvement of RC Panels by FRP Retrofitting", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 22, No. 1, 2010, pp. 93-102.
9. *Patterns of Global Terrorism 2003*, United States Department State, 2004, pp. 179.
10. Bank, L. C., *Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials*, John Wiley & Sons, NJ, USA, 2006, pp. 214-271.
11. Teng, J. G., Chen, J. F., Smith, S. T., and Lam, L., *FRP-Strengthened RC Structures*, John Wiley & Sons, West Sussex, England, 2002, pp. 31-46.
12. Wu, C., Oehlers, D. J., Rebertrost, M., Leach, J., and Whittaker, A. S., "Blast Testing of Ultra-high Performance Fibre and FRP-retrofitted Concrete Slabs," *Engineering Structures*, Vol. 31, No. 9, 2009, pp. 2060-2069.
13. Min, K. H., Shin, H. O., Yoo, D. Y., and Yoon, Y. S., "Flexural and Punching Behaviors of Concrete Strengthening with FRP Sheet and Steel fibers under Low-Velocity Impact Loading", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 23, No. 1, 2011, pp. 31-38.
14. Lee, J. Y., Kim, M. H., Min, K. H., Yoon, Y. S., "Analysis of Behaviors of Concrete Strengthened with FRP Sheets and Steel Fibers under Low-Velocity Impact Loading", *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection*, vol. 15, No. 4, 2011, pp. 155-164.
15. TM5-1300/AFR 88-2/NAVFAC P-39, *Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions*, Joint Departments of the Army, Air Force and Navy Washington, DC, November, 1990, TMCD Version.
16. Unified Facilities Criterion (UFC 4-010-01), *DoD Minimum Antiterrorism Standards for Buildings*, Washington, 31 July 2002.
17. TM5-855-1/AFPAM32-1147/NAVFACP-1080/DAHS CWEMAN-97, *Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapons Effects*, Joint Departments of the Army, Air Force, Navy and the Defense Special Weapons Agency, Washington, DC, December 1997.
18. Yamaguchi, M., Murakami, K., Takeda, K., and Mitsui, Y., "Blast Resistance of Polyethylene Fiber Reinforced Concrete to Contact Detonation," *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 9, No. 1, 2011, pp. 63-71.
19. Lonnquist, L., "The Effects of High Explosives in Contact with Reinforced Concrete Plates," *Proceedings of the 6th International Symposium Interaction of Nonnuclear Munitions with Structures*, Panama City, USA, 1993, pp. 262-266.
20. Kraus, D., Roetzer, J., and Thoma, K., "Effect of High Explosive Detonations on Concrete Structures," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 150, No. 2-3, 1994, pp. 309-314.
21. Wang, Z. L., Konietzky, H., and Huang, R. Y., "Elastic-Plastic-Hydrodynamic Analysis of Crater Blasting in Steel Fiber Reinforced Concrete," *Theoretical and Applied Fracture mechanics*, Vol. 52, No. 2, 2009, pp. 111-116.
22. Saatci, S. and Vecchio F. J., "Effects of Shear Mechanism on Impact Behavior," *ACI Structure Journal*, Vol. 106, No. 1, 2009, pp. 78-86.
23. Chen, C. C. and Li, C. Y., "Punching Shear Strength of Reinforced Concrete Slabs Strengthened with Glass Fiber Reinforced Polymer Laminates," *ACI Structural Journal*, Vol. 102, No. 4, 2005, pp. 535-542.
24. Yoo, D. Y., Min, K. H., Lee, J. Y., and Yoon, Y. S., "Enhancement of Impact Resistance of Layered Steel Fiber Reinforced High Strength Concrete Beam", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 24, No. 4, 2012, pp. 369-379.
25. Wang, Z. L., Wu, L. P., and Wang, J. G., "A Study of Constitutive Relation and Dynamic Failure for SFRC in Compression," *Construction and Building Materials*, Vol. 24, No. 8, 2010, pp. 1358-1363.

---

**요약** 본 연구에서는 폭발에 의한 국부손상이 철근콘크리트 보의 잔류 휨강도 및 연성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 160×290×2200mm의 철근콘크리트 보에 대하여 근접 폭발 시험과 정하중 휨시험을 수행하였다. 또한 이 시험을 통해 강섬유 및 FRP 시트로 보강한 철근콘크리트 보의 폭발저항성을 평가하였다. 장약량 1kg, 이격거리 0.1m의 폭발 시험을 수행하였으며, 시험 후 시험체의 crater, spall 지름과 무게손실(weight loss)을 측정하여 시험체의 국부손상을 평가하였다. 또한 폭발하중을 받지 않은 시험체와 폭발하중을 받아 국부손상이 발생한 시험체의 정하중 휨시험을 수행하여 휨강도 및 연성지수를 측정하였다. 시험결과, 보통콘크리트 시험체(NC)는 비교적 큰 crater와 spall이 발생하였으며 국부손상에 의한 무게 손실이 23.5kg 발생하였다. 반면 강섬유보강콘크리트 시험체(SFRC)와 FRP 시트 보강 시험체(NC-F, NC-FS)는 NC에 비해 crater 크기와 무게손실이 감소하며 향상된 폭발저항성을 나타내었다. 또한 폭발하중에 의해 국부손상이 발생한 시험체들은 휨강도와 연성지수가 감소하였다. 특히 NC는 잔류 휨강도가 기존 강도에 비해 크게 감소하였고 압축철근의 좌굴현상이 나타나며 취성적으로 파괴되었다. 강섬유와 FRP 시트로 보강한 시험체의 경우 잔류 휨강도 및 연성지수가 NC에 비해 증가하였다. 이를 통해 폭발이 발생할 경우, 충분한 이격거리를 확보하지 못하면 장약량이 적더라도 구조부재에 심각한 국부손상을 발생 시킬 수 있다는 것을 알 수 있었으며, 강섬유와 FRP 시트에 의한 보강 방법이 폭발저항성을 향상시킨다는 것을 확인할 수 있었다.

**핵심용어** : 폭발시험, 강섬유보강콘크리트(SFRC), FRP 시트, 국부손상, 잔류 휨강도